

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA MATEMÁTICA E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE FÍSICA

PROJETO FINAL DE CURSO

INSTRUMENTAÇÃO PARA O ENSINO DE FÍSICA  
(FIWK01)

*“Aproveitando o Conhecimento Adquirido a Nível de  
Segundo Grau para Introduzir um Conhecimento Novo:  
Ensinando Difração de Raios x no Ensino Médio”*

Sandro Batista da Silva  
Orientador: Manoel Rothier do Amaral Jr.

Monografia apresentada ao Instituto de Física  
da Universidade Federal do Rio de Janeiro  
para a obtenção do grau de Licenciando em Física.

Rio de Janeiro  
Agosto de 2002



*“a mente que se abre a uma nova idéia,  
jamais volta ao seu tamanho original”*

(1879-1955) **Albert Einstein**

Físico Alemão

## **Agradecimentos**

**Primeiramente, agradeço a Deus,  
por ter me ajudado a superar as dificuldades,  
aos meus pais, que, com certeza, sem eles  
nada disso teria acontecido,  
minha esposa e a meus filhos Vinícius e João Vitor,  
que são a minha razão de viver  
e ao meu mestre pela, boa vontade, paciência e experiência  
e os conhecimentos que a mim, vem transmitindo, nesta jornada.  
A todos vocês, o meu muito obrigado.**

**O autor.**

# ÍNDICE

<b>1. Justificativa .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Introdução .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Ondas eletromagnéticas .....</b>	<b>6</b>
<b>4. A radiação x .....</b>	<b>9</b>
4.1. A geração de radiação x .....	9
4.2. O espectro da radiação obtida em um tubo de <i>raio x</i> .....	10
4.3. Detecção da radiação x .....	12
4.4. Cuidados na operação da radiação x .....	13
<b>5. A interação da radiação x com a matéria .....</b>	<b>15</b>
5.1. Absorção da radiação x .....	15
<b>6. Difração da radiação x .....</b>	<b>18</b>
6.1 A Lei de Bragg .....	18
<b>7. Alguns métodos de difração .....</b>	<b>23</b>
<b>8. Algumas aplicações da radiação x .....</b>	<b>26</b>
<b>9. Conclusão .....</b>	<b>27</b>
<b>10. Referências bibliográficas .....</b>	<b>30</b>

## 1. Justificativa

Este trabalho apresenta ao aluno, do último ano do ensino médio, uma série de informações sobre um novo assunto, a radiação x. Ele permite ao aluno consolidar a construção de seus conhecimentos, somando-se aos conhecimentos construídos em anos anteriores, como por exemplo, conceitos de Física Ondulatória: interferência, difração; da Química: átomos, níveis atômicos; etc. Com isso, o aluno pode por em prática, mas não de maneira isolada, algumas informações que lhes foram fornecidas por seus professores, ao longo de seus anos de estudo.

Com a finalidade de motivar e aguçar a curiosidade e despertar o interesse do estudante, tentamos sensibilizá-lo para o entendimento das aplicações dos *raios x* no dia-a-dia e as suas relações teóricas.

Acreditamos que a Física deve contribuir para que o estudante, em seu processo de individualização, não só construa um esquema conceitual, mas também desenvolva uma visão crítica sobre o assunto. Dentro da perspectiva, escola e professor são cada vez mais imprescindíveis na tarefa de preparar o jovem para desenvolver competências que o tornem capaz de responder às demandas do mundo contemporâneo.

Sem pretender dar ao ensino de Física um caráter de especialização, procuramos fornecer ao estudante instrumentos para conhecer, com certa profundidade, os *raios x* a partir do desenvolvimento gradual de conhecimentos novos com apoio dos conhecimentos anteriormente construídos. Para isso, é imprescindível considerar o mundo vivencial dos alunos, sua realidade próxima ou distante, os objetos e fenômenos com que efetivamente lidam, ou os problemas e indagações que movem sua curiosidade. Esse deve ser o ponto de partida e, de certa forma, também o ponto de chegada. Ou seja, feitas as investigações, abstrações e generalizações potencializadas pelo saber da Física, em sua dimensão conceitual, o conhecimento volta-se novamente para os fenômenos significativos ou objetos tecnológicos de interesse, agora com um novo olhar, como o exercício de utilização do novo saber adquirido, em sua dimensão aplicada ou tecnológica. O saber assim adquirido reveste-se de uma universalidade maior que o âmbito dos problemas tratados, de tal forma

que passa a ser instrumento para outras e diferentes investigações. Essas duas dimensões, conceitual/universal e local/aplicada, de certa forma constituem-se em um ciclo dinâmico, na medida em que novos saberes levam a novas compreensões do mundo e à colocação de novos problemas. Portanto, o conhecimento da Física “em si mesmo” não basta como objetivo, mas deve ser entendido sobretudo como um meio, um instrumento para a compreensão do mundo, podendo ser prático, mas permitindo ultrapassar o interesse imediato.

Sendo o Ensino Médio um momento particular do desenvolvimento cognitivo dos jovens, o aprendizado de Física tem características específicas que podem favorecer uma construção rica em abstrações e generalizações, tanto de sentido prático como conceitual. Levando-se em conta o momento de transformações em que vivemos, promover a autonomia para aprender deve ser preocupação central, já que o saber de futuras profissões pode ainda estar em gestação, devendo buscar-se competências que possibilitem a independência de ação e aprendizagem futura.

Com o advento do que se denomina sociedade pós-industrial, a disseminação das tecnologias da informação nos produtos e nos serviços, a crescente complexidade dos equipamentos individuais e coletivos e a necessidade de conhecimentos cada vez mais elaborados para a vida social e produtiva, as tecnologias precisam encontrar espaço próprio no aprendizado escolar regular, de forma semelhante ao que aconteceu com as ciências, muitas décadas antes, devendo ser vistas também como processo, e não simplesmente como produto. A tecnologia no aprendizado escolar deve constituir-se também em instrumento da cidadania, para a vida social e para o trabalho. No Ensino Médio, a familiarização com as modernas técnicas de edição, de uso democratizado pelos computadores pessoais, é só um exemplo das vivências reais que é preciso garantir, ultrapassando-se assim o “discurso sobre as tecnologias” de utilidade questionável. É preciso identificar na Matemática, nas Ciências Naturais, Ciências Humanas, Comunicações e nas Artes, os elementos de tecnologia que lhes são essenciais e desenvolvê-los como conteúdos vivos, como objetivos da educação e, ao mesmo tempo, como meios para tanto.

A construção deste novo conhecimento, requer uma revisão de alguns conceitos, para uma compreensão básica sobre o estudo da radiação x. Um assunto como este, além de introduzir um novo conteúdo, permite dar uma visão da aplicação de alguns conceitos já adquiridos no estudo da radiação x. Como por exemplo, frequência e período dentro do

contexto de movimento ondulatório, cálculo de potência dissipada dentro do estudo de Energia (Dinâmica), da Química modelo atômico e níveis atômicos, entre outros, mostrando as suas aplicações dentro do estudo da radiação x, permitindo ao aluno entender e enriquecer os seus conhecimentos acerca deste estudos e que não é, a radiação x, algo distante do seu dia-à-dia.

## 2. Introdução

Em 1895 o físico alemão Wilhelm Konrad von Röntgen descobre acidentalmente os *raios x*. No dia 08 de outubro quando Röntgen realizava experiências com descargas elétricas em um tubo de raios catódicos (fig. 1.1.). Quando trabalhava em uma sala escura e cobriu o tubo com uma cortina preta. E verificou que algo acontecia fora da válvula e fazia brilhar no escuro materiais fluorescentes. Algum tipo de radiação estava se processando, vinda do tubo, passando pela cortina, e produzindo uma luz fluorescente. Röntgen colocou vários objetos na direção da radiação, mas

não acontecia nada, finalmente ele colocou a mão nesta direção e viu a sombra da imagem de seus ossos. Ele havia descoberto os *raios x*. Eram os raios capazes de impressionar chapas fotográficas através de papel preto. Produziam fotografias que revelavam moedas nos bolsos e os ossos das mãos. Por essa descoberta, Röntgen recebeu em 1901 o primeiro prêmio Nobel da história da Física.

Com a radiação x pode-se verificar um ponto de fratura em um osso quebrado ou uma fissura em um metal pode ser localizada. Em 1912, Max von Laue sugeriu que em um cristal os átomos estão distribuídos em posições regulares e o cristal pode ser imaginado como uma repetição de blocos em forma de poliedros. As distâncias típicas interatômicas são da ordem do comprimento de onda de  $1\text{\AA}$ , e esta é a condição para que uma onda sofra difração.

A radiografia foi iniciada sem qualquer entendimento do uso da radiação até 1912, quando se descobriu a natureza exata dos *raios x*. Nesse mesmo ano, o fenômeno de difração de *raios x*, por cristais, foi descoberto. Foi provado, simultaneamente, a natureza

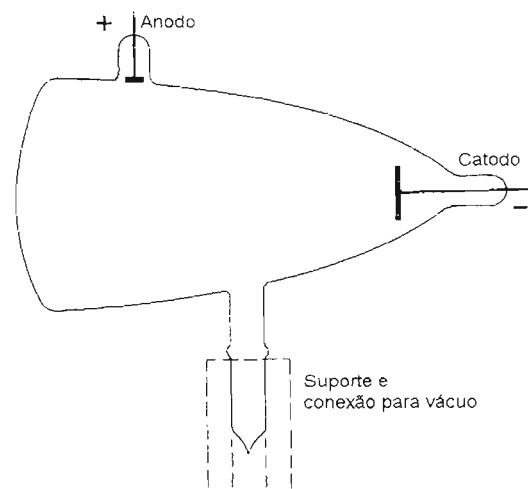


Fig. 2.1 - Diagrama de um tubo de raios catódicos com o qual Röntgen descobriu os *raios x* (fonte: CULLITY, B. D., "Elements of X-Ray Diffraction" <sup>2</sup>).



ondulatória dos *raios x* e também descoberto um novo método para investigar a fina estrutura da matéria.

Hoje, sabemos que os *raios x* são radiações eletromagnéticas, com as mesmas características que a luz, mas de comprimento de onda curtíssimos. No espectro eletromagnético, os *raios x* ocupam a região entre os raios gama e ultravioleta.

### 3. Ondas eletromagnéticas

Os raios x e os raios gama pertencem à categoria das radiações eletromagnéticas, à qual pertencem também as ondas de rádio, televisão e radar, as microondas, a luz (infravermelho, visível e ultravioleta). Estas radiações caracterizam-se por possuírem frequência numa larga faixa de valores. Algumas vezes, as radiações eletromagnéticas são caracterizadas não pela sua frequência, e sim pelo seu comprimento de ondas. A relação entre a frequência, comprimento de onda e período deve ser entendida, assim como os seus respectivos significados.

Uma onda senoidal unidimensional é descrita pela equação

$$y(x,t) = A \sin\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right), \quad (3.1)$$

onde  $A$  é a amplitude,  $x$  é a posição,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $t$  é o tempo e  $T$  é o período. O período,  $T$ , é o intervalo de tempo entre duas oscilações (sua unidade é segundo) (fig. 3.1). A frequência,  $f$ , de uma radiação é o número de oscilações por segundo (sua unidade é  $\text{segundo}^{-1}$ , que é denominado Hertz). É possível mostrar que período é o inverso da frequência,

$$f = \frac{1}{T}. \quad (3.2)$$

O comprimento de onda,  $\lambda$ , é a distância entre duas oscilações sucessivas (sua unidade é metro) (fig. 3.2). A relação entre essas variáveis é,

$$\lambda = T c, \quad (3.3)$$

onde  $c$  é a velocidade de propagação da onda, que no caso de uma onda eletromagnética propagando no vácuo é de aproximadamente 300.000 km/s. Dessa maneira, à medida que aumenta a frequência de uma radiação, diminui o comprimento de ondas e vice-versa.

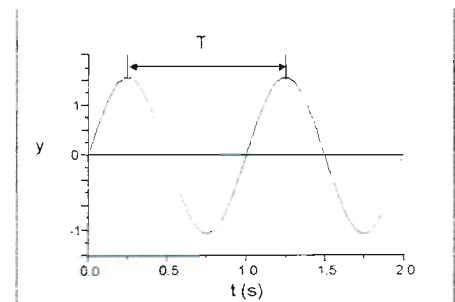


Fig. 3.1 - Período da função periódica  $y(x,t)$ ,  $x = \text{constante}$ .

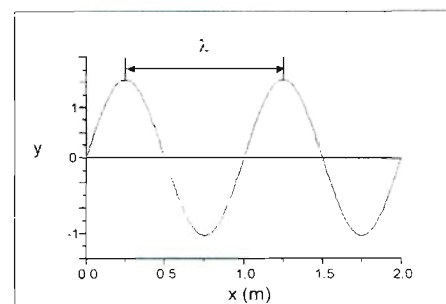


Fig. 3.2 - Comprimento de onda da função periódica  $y(x,t)$ ,  $t = \text{constante}$

As ondas eletromagnéticas são perturbações criadas devido à variação periódica do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e magnético ( $\vec{H}$ ), perpendiculares entre si, propagando-se no espaço, conforme figura (3.3). Consideremos uma onda eletromagnética monocromática, isto é, que possui um único comprimento de onda, propagando-se ao longo da direção  $x$  (fig. 3.4).

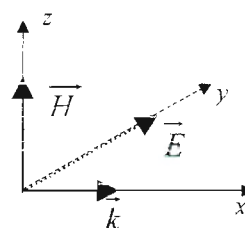


Fig. 3.3 - Campo elétrico e magnético de uma onda propagando-se ao longo da direção  $x$ .

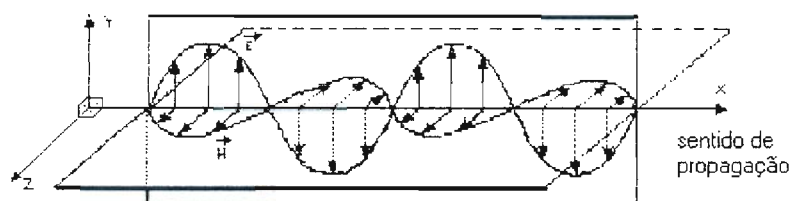


Fig. 3.4 – Propagação de uma onda eletromagnética na direção  $x$ . (fonte “Física Clássica – Óptica e Ondas CALAÇA, Caio Sérgio e SAMPAIO, José Luiz”<sup>13</sup>)







No estudo de ondas, verificou-se que elas ocorrem quando uma perturbação originada em uma região pode ser reproduzida nas regiões adjacentes em um instante posterior.

De acordo com MAXWELL, James Clerk (1831-1879) se em um ponto qualquer produzirmos um campo elétrico  $\vec{E}$  variável, ele induzirá um campo magnético  $\vec{H}$  variável com o tempo e com a distância. Além disso, o vetor  $\vec{H}$  variável induzirá o vetor  $\vec{E}$ , que também varia com o tempo e com a distância do campo magnético variável. Essa indução recíproca de campos magnéticos e elétricos, variáveis com o tempo e com a distância, torna possível a propagação dessa seqüência de induções através do espaço.

Portanto uma perturbação elétrica em uma ponto qualquer, devida a oscilação de cargas elétricas, por exemplo, se propaga a pontos distantes através da mútua formação de campos elétricos e magnéticos variáveis. Maxwell estabeleceu equações para a propagação dessa perturbação, mostrando que ela apresentava todas as características de uma onda: refletindo, refratando e interferindo. Por isso, denominou-a **ondas** ou **radiação eletromagnéticas**.

A tabela 1 exemplifica os diferentes tipos de ondas eletromagnética.

**Tab. 1** - Classificação das ondas eletromagnéticas, segundo o comprimento de ondas ( $\lambda$ ) e a frequência ( $f$ ).

Comprimento de onda ( $\lambda$ )											
Frequência ( $f$ )											
$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$	$10^8$	$10^9$	$10^{10}$	$10^{11}$
Rádios longos		Rádios X		Comunicação		Infravermelho		Microondas		Ondas de rádio	
											
<p>Comprimento de onda (<math>\lambda</math>)</p> <p>Frequência (<math>f</math>)</p> <p>Velocidade da luz (<math>c</math>)</p>											

(fonte: "As Faces da Física", CARRON, Wilson e GUIMARÃES, Osvaldo<sup>12</sup>).

## 4. A radiação x

### 4.1 A geração da radiação x

Os *raios x* são usualmente obtidos através do choque de elétrons, que se deslocam em alta velocidade, contra um anteparo. Atingindo um átomo, duas coisas podem ocorrer com estes elétrons, uma é que eles forçam o desprendimento de elétrons de órbitas próxima ao núcleo, o que ocasiona um desarranjo na distribuição eletrônica e a outra é a desaceleração do elétron e a emissão, conseqüentemente, de radiação dita “branca”. Ao se rearranjar, o átomo perturbado emite energia sob a forma de *raios x*, com características próprias, dependendo da natureza do anteparo e da energia dos elétrons usados no bombardeio.

Na prática, os *raios x* são produzidos por válvulas especiais (tubos de Röntgen), no interior das quais existe um filamento ligado a uma fonte de tensão variável, da ordem de 10V, responsável pela incandescência do filamento, permitindo o controle do aumento ou diminuição de elétrons emitidos. O filamento aquecido é ligado ao pólo negativo da fonte de alta tensão (cátodo) e o anteparo metálico ao positivo (ânodo), que é mantido aterrado por medida de segurança (fig. 4.1). Os elétrons emitidos pelo filamento são acelerados por uma diferença de potencial da ordem de milhares de volts, aplicada entre o filamento e o anteparo metálico, indo chocar-se contra o anteparo. Resumindo, qualquer tubo de *raios x* deve contar, portanto, (a) com uma fonte de elétrons; (b) uma alta voltagem de aceleração e (c) um metal alvo (ânodo).

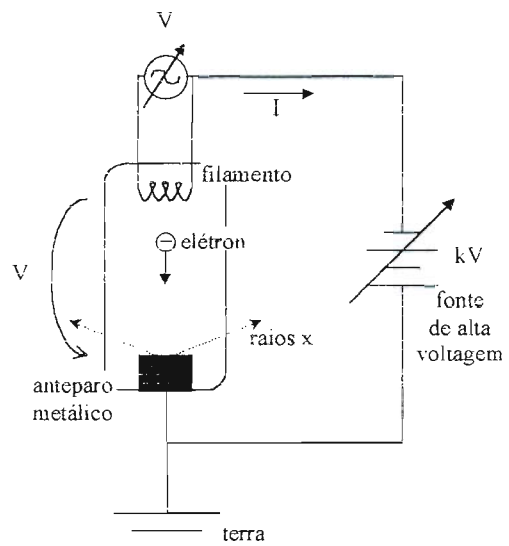


Fig. 4.1 - Representação esquemática da produção de *raios x* em um tubo com filamento.

Dependendo da finalidade, diferentes elementos químicos podem ser escolhidos como anteparo metálico. Elementos químicos com menor número atômico fornecem radiação x com menor frequência.

Suponhamos um tubo de *raios x* submetido a uma diferença de potencial de 35kV e que a intensidade de corrente seja 30mA. A potência fornecida ao tubo é

$$P = V I = 35\text{kV} \times 30\text{mA} = 1050\text{W}, \quad (4.1)$$

que corresponde a aproximadamente ao 10 lâmpadas residenciais de 100W. Como apenas uma fração desta energia, menos que 1%, é convertida em *raios x*, temos

$$P_X < 1\% \times 1050 = 10,5\text{W}. \quad (4.2)$$

Como dos 1050W fornecidos ao tubo de *raios x* no máximo 10,5W foram efetivamente convertidos em radiação, o que aconteceu com os 1039,5W restantes? Esta energia foi convertida em calor.

Como acabamos de ver, a maior parte da energia cinética do elétron não é convertida em *raios x* e sim em calor no anodo. E o que ocorre com o calor gerado? Como ele é dissipado? A questão da refrigeração está ligada ao tempo de utilização do tubo. Se este tubo de *raios x* for utilizado por um tempo muito curto, o que é o caso dos aparelhos normalmente utilizados consultórios dentários e hospitais<sup>1</sup>, então não teremos muito problema. No caso da utilização desta fonte de *raios x* em aplicações que envolvam um longo tempo de utilização, já se faz necessário a refrigeração. O tubo de *raios x* não tem, por si só, como dissipar este calor, por esse motivo ele deve ser refrigerado com água para evitar a fusão do anteparo metálico.

## 4.2 O espectro da radiação obtida em um tubo de *raios x*

Como já visto anteriormente, o filamento é uma fonte de elétrons, que são emitidos em alta velocidade em direção ao metal alvo, onde colidem com os átomos constituintes do anodo. Dependendo da forma de interação do elétron com o átomo constituinte do anodo, duas situações podem ocorrer (fig. 4.2).

### 1. Espectro contínuo

Quando cargas elétricas são desaceleradas ocorre emissão de energia. Porém, nem todos os elétrons são desacelerado da mesma forma, alguns são parados no

---

<sup>1</sup> No caso de aparelhos médicos geralmente as voltagens usadas em aparelhos médicos oscilam entre 40kV e 200kV.

momento do impacto, e cedem toda a sua energia cinética. Outros elétrons são desviados de sua direção original pelos átomos alvos, perdendo, conseqüentemente, uma fração de sua energia cinética total. Os elétrons que são parados no momento do impacto têm toda sua energia convertida em *raios x* sendo

$$eV = h\nu_{max}, \quad (4.3)$$

onde  $e$  é a carga do elétron,  $V$  é a diferença de potencial (fig. 3.1),  $h$  é a constante de proporcionalidade denominada constante de Planck<sup>2</sup> e  $\nu_{max}$  é a frequência máxima que pode ser fornecida pelo tubo de *raios x*.

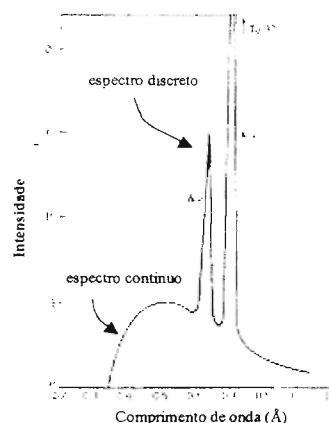


Fig. 4.2 - Espectro do molibdênio a 35kV (fonte: "Elements of X-Ray Diffraction", CULLITY, B. D.<sup>2</sup>)

## 2. Espectro discreto

Consideremos um átomo no anteparo, as órbitas ou camadas eletrônicas segundo o modelo atômico de Rutherford-Bohr são K, L, M, N, O, P e Q fig. (4.3). Quando os elétrons, em alta velocidade, colidem com um elétron no interior de um átomo pesado, eles jogam esse elétron completamente para fora do átomo. Essa colisão deixa o átomo como um íon positivo, com um orbital vago, próximo ao seu núcleo

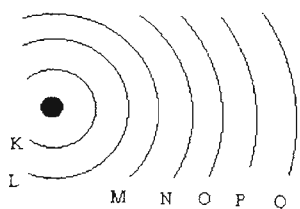


Fig. 4.3 - Representação do modelo atômico de Rutherford-Bohr

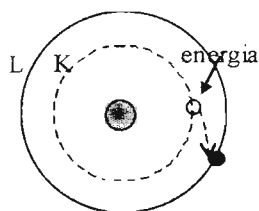


Fig. 4.4 - Recebendo energia, o elétron salta de uma órbita interna para outra mais externa; a quantidade de energia recebida é, porém, bem definida (**quantum** de energia)

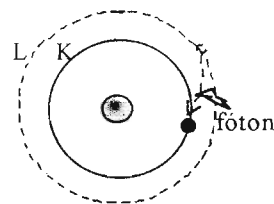


Fig. 4.5 - Ao "voltar" de uma órbita mais externa para outra mais interna, o elétron emite um quantum de energia, na forma de *raios x* (daí o nome **fóton** que é dado para esse **quantum** de energia)

<sup>2</sup>  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s, e está relacionada a quantidade de energia recebida ou cedida por um fóton sua frequência de oscilação.

(fig. 4.4.). Quando um elétron neste átomo faz uma transição eletrônica, saindo de um orbital mais externo para o orbital vazio há uma emissão de energia (fig. 4.5). (fonte: Química Geral, vol. 1, FELTRE, Ricardo<sup>8</sup>)

Se o elétron da camada K é removido de um átomo pelos elétrons incidentes, o átomo sofre uma modificação na sua distribuição eletrônica. Se um elétron se move do nível L para o K (fig. 4.5), para preencher o espaço vago pelo elétron removido, o átomo sofre uma transição do estado K para o L. Essa transição é acompanhada pela emissão da radiação característica  $K_{\alpha}$  (fig. 4.2).

A intensidade de qualquer linha característica, para ser calculada, depende da corrente do tubo I e da voltagem aplicada V que deve ser superior a voltagem de excitação dessa linha. Por exemplo para a linha K a intensidade é dada por:

$$I_K = B I (V - V_K)^n, \quad (4.4)$$

onde B é uma constante de proporcionalidade e  $n \approx 1,5$ .

### 4.3 Detecção da radiação x

Alguns dos meios utilizados para a detecção de um feixe de *raio x* são:

- ***anteparo fluorescente*** - são feitos de uma camada de zinco, contendo traços de níquel, montada com uma proteção de papelão (cartolina). Sob a ação dos *raios x*, este composto emite luz visível de cor amarela.
- ***filmes fotográficos*** - são afetados por *raios x*, sendo utilizados tanto na área médica e odontológica como também em aplicações científicas.
- ***dispositivo de ionização*** - mede a intensidade dos feixes de *raios x* pelo total de ionização produzida em um gás. Os detectores Geiger-Müller, figura 4.6, são dispositivos para detecção de radiações  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e também de *raios x*. São constituídos por uma câmara, em geral, cilíndrica, contendo uma mistura de gasosa

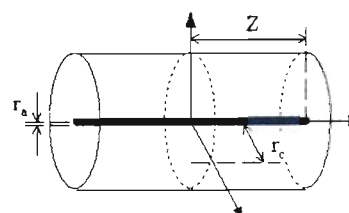


Fig. 4.6.- Diagrama de um Geiger Muller (fonte: site [www.geiger.com.br](http://www.geiger.com.br)<sup>10</sup>).



adequada e dois eletrodos, entre os quais se estabelece uma diferença de potencial. Como as radiações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $x$  são facilmente absorvidas, os detectores possuem no seu topo ou na face lateral uma fina janela que permite a entrada da radiação no seu interior. A radiação provoca a ionização do gás ou arranca elétrons das superfícies. Estes elétrons, por sua vez vão provocar mais ionizações originando uma descarga elétrica no gás.

Como já discutimos, em um tubo de *raios x* apenas 1% da energia total envolvida é convertida em radiação  $x$ , logo a intensidade dos feixes de *raios x* difratados é extremamente baixa. Por esse motivo, constantes esforços, são feitos para aumentar a intensidade da fonte de *raios x*.

#### 4.4 Cuidados na operação da radiação $x$

O operador de aparelhagem de *raios x*, está exposto a dois tipos de perigos óbvios: o choque elétrico e a radiação:

- o perigo de choque elétrico está sempre presente nas aparelhagens de alta voltagem.
- os *raios x* podem destruir o tecido humano. Esta propriedade pode ser utilizada de forma benéfica, como para matar as células de câncer (terapia com *raios x*). Os efeitos biológicos dos *raios x* são queimaduras (devido a feixes localizados de alta intensidade) e doenças diversas devido a radiação (devido a radiação recebida, geralmente, por todo corpo).



Fig. 4.7 - Símbolo de perigo utilizado em área radioativa.

Ambos os perigos podem ser reduzidos a proporções desprezíveis analisando-se o desenho de equipamento e tomando razoáveis cuidados na sua utilização. Apesar disso, tendo ciência destes perigos, deve-se ter prudência ao se trabalhar continuamente com os *raios x*.

Sempre que virmos, portas e recipientes com o símbolo de radiação estampada (fig. 4.7), devemos tomar cuidado ao entrar no local ou mexer nos recipientes, pois podemos estar correndo sérios riscos. No caso de recipientes se forem encontrados na rua não devemos abri-los, devemos o mais rápido possível, entrar em contato com as pessoas

especializadas em radiação para resolver o problema e o encaminhá-los para um local adequado.

### **1. Lesões causada pela radiação x**

As lesões devidas a radiação se manifestam por um grande número de formas. A exposição à radiação maciça causa uma lesão que pode ser evidente em minutos ou dias, enquanto as exposições de curto período e repetidas provocam uma resposta que só pode surgir após vários anos. Embora as lesões devida à radiação tenham características distintas, as manifestações retardadas ou os efeitos lesivos tardios da radiação (termos preferíveis à lesão retardada de radiação) podem ser indiferenciáveis das afecções que ocorrem espontaneamente, como a leucemia.

Um estudo epidemiológico demonstrou que as mães de crianças leucêmicas tinham sido submetidas a maior número de exames radiológicos diagnósticos do que as mães de crianças selecionadas ao acaso. Estas exposições não ocorreram somente durante a gestação da criança, mas também durante o período preconcepção. Embora a exposição à radiação não tenha sido estabelecida como uma causa da leucemia, estes resultados sugerem que não se pode atribuir um limar para certos tipos de lesão somática devida à radiação.

Os casos conhecidos de lesão devida à radiação no homem são resultado de exposição à radiação de fontes de radiação feitas pelo homem. Em tempo de paz, estas exposições são quase exclusivamente médicas ou industriais e, no caso de manifestações tardias, podem ter ocorrido há tanto tempo que já foram esquecidas.

## 5. A interação de *raios x* com a matéria

### 5.1 Absorção da radiação *x*

Está é propriedade utilizada na área médica e odontológica, onde o paciente que necessita de uma radiografia fica exposto a radiação *x* que é direcionada (como por exemplo a perna em caso de suspeitas de fraturas). Os *raios x* atravessam o tecido humano e impressionam o filme, e o escurecendo, enquanto que os ossos absorvem a radiação, ficando a área correspondente a eles, mais claro no filme, portanto visível. Isto possibilita aos médicos fornecerem um diagnóstico ao paciente.

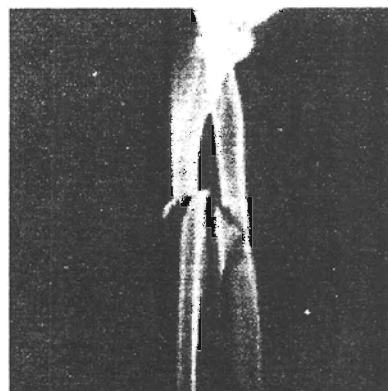


Fig. 5.1 – Radiografia de uma fratura dos ossos da perna  
(fonte: [www.terra.com.br/fisicanet/fisicamoderna/fisicaquantica/os\\_raios\\_x.htm](http://www.terra.com.br/fisicanet/fisicamoderna/fisicaquantica/os_raios_x.htm))

Ao atravessar qualquer forma de matéria, a radiação será amortecida por absorção e por dispersão ou espalhamento. Denomina-se absorção ao processo pelo qual parte da energia da radiação é transformada em outra forma de energia, como por exemplo, calor. A dispersão ou espalhamento consiste numa alteração da trajetória retilínea dos *raios x* por interação com a matéria, causando, como consequência, diminuição de sua intensidade, em dada direção. Este fenômeno depende das interações dos *raios x* com os átomos constituintes da matéria, e não de sua constituição molecular, como acontece com a luz visível.

Os principais fatores que determinam a absorção e a dispersão são:

- a) tipo de átomo que entra na composição da matéria irradiada;
- b) densidade e espessura do material;
- c) comprimento de onda da radiação de empregada. O poder de absorção aumenta com o número atômico, com a densidade e espessura do material e com o comprimento de onda da radiação.

Quando um feixe monocromático de *raios x* atinge um átomo, dois processos de espalhamento ocorrem: os elétrons são postos em oscilação e emitem *raios x* de mesmo comprimento de ondas que o feixe incidente. Mas os elétrons livres espalham parte do feixe

incidente e aumenta levemente o comprimento de ondas desse feixe no processo. A quantidade exata do aumento depende do ângulo de espalhamento.

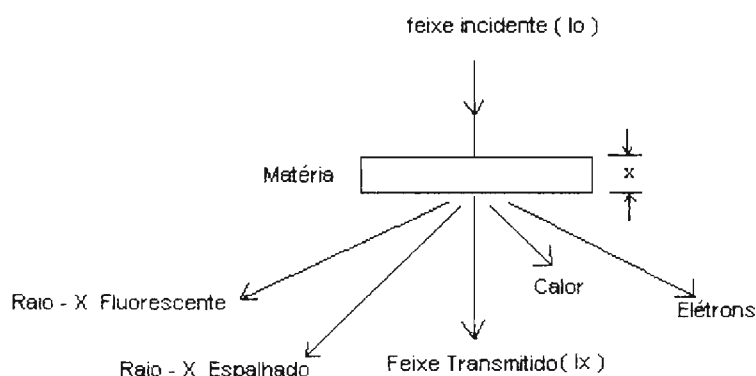


Fig.5.1 - Os efeitos produzidos pela passagem da radiação x através da matéria. (fonte: “Elements of X-Ray Diffraction”, CULLITY, B. D.<sup>2</sup>).

Os principais efeitos associados a passagem de *raios x*, através da matéria:

Os efeitos decorrentes da passagem de *raios x* através da matéria, estão demonstrados esquematicamente na fig. (5.1). Na figura supõe-se que a radiação x incidente possui uma energia elevada, isto é, de comprimento de onda bastante curto, para causar a emissão de fotoelétrons e radiação florescente característica.

É fato comprovado que o poder de penetração das ondas eletromagnéticas através da matéria é inversamente proporcional ao comprimento de onda, isto é, aumenta com a frequência. Assim, dentro categoria dos *raios x*, o poder de penetração é variável com a frequência dos mesmos, reservando-se a denominação de raios *moles* para os de menores frequência (e portanto, de menor poder de penetração), e raios *duros* para os de maior frequência. Conforme a equação (4.3), quanto maior a diferença de potencial empregada para acelerar os elétrons, mais duros.

Uma propriedade importante dos *raios x* empregados na radiologia é o *poder ionizante*, que é a capacidade de arrancar elétrons dos átomos, ionizando-os. Esta

propriedade é utilizada na construção da câmara de ionização, que com o desenvolvimento da eletrônica, permitiu que essas câmaras possam além de indicar a passagem de uma partícula, fornecer elementos para o cálculo da sua energia. E é também utilizada como instrumentos de medida de intensidade de radiação, sem a determinação da energia

Quando os *raios x* encontram qualquer forma de matéria (fig. 5.1), eles são em parte transmitidos e em parte absorvidos. Experimentos mostram que o decréscimo da intensidade  $I$  dos *raios x* ao atravessar qualquer substância homogênea é

$$I_x = I_o e^{-x\mu}, \quad (5.1)$$

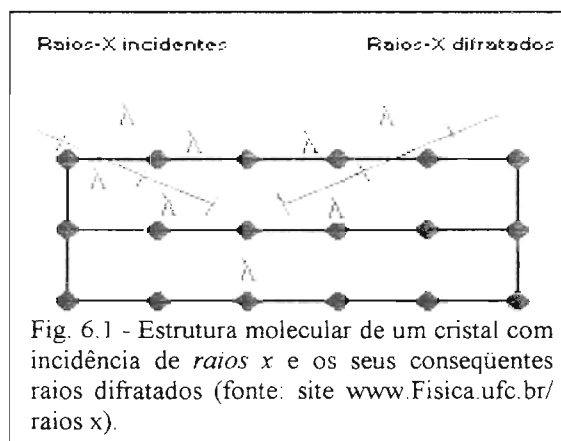
onde  $I_x$  é a intensidade transmitida depois de passar através de uma espessura  $x$ ,  $I_o$  é a intensidade dos *raios x* incidente e  $\mu$  é um coeficiente que depende da substância envolvida.

A matéria absorve os *raios x*, por dois caminhos distintos: por espalhamento ou dispersão e pela absorção verdadeira e esses dois processos juntos fazem a absorção total, medida pela quantidade  $\mu$ .

Se um feixe de *raios x* de comprimento de onda adequada incide sobre um cristal, parte do feixe o atravessa, mas outra parte é espalhada pelos átomos do cristal. Já a absorção verdadeira é causada por uma transição eletrônica dentro do átomo. A descrição deste fenômeno requer a utilização da teoria quântica e foi discutido na seção 4.2 (o espectro da radiação obtida em um tubo de *raios x*).

## 6. A difração de *raios x*

Imagine que um feixe de *raios x* incida sobre um cristal fig. (6.1). Como o espaçamento entre os átomos do cristal tem um valor comparável com o comprimento de onda dos *raios x*, o feixe se refletirá nos planos dos átomos como em um espelho. Veja o que se passa com dois raios que incidem em planos vizinhos. Os máximos



(“altos”) de cada onda são assinalados com uns tracinhos. Um dos raios do desenho, em cor verde, incide no plano de baixo e percorre uma distância um pouco maior que o outro, pintado de vermelho. A diferença entre os dois caminhos é mostrada na trajetória do raio verde, com uma cor rosa. Nesse desenho, essa diferença é exatamente um comprimento de onda. Portanto, os raios refletidos (ou “difratados”, no caso) saem em fase e terão interferência construtiva. É claro que isso só acontece para um ângulo de incidência bem determinado, fig.6.1.

### 6.1 A lei de Bragg

W.H. Bragg mostrou que as condições para que houvesse uma interferência construtiva é que os planos cristalinos emitam numa direção tal que equivalha a uma reflexão medida do feixe, isto é que o ângulo de incidência seja igual ao de reflexão, e que as diferenças de caminhos percorridos pela radiação refletida nos diversos planos sejam múltiplos inteiros de  $\lambda$ . Essa última consideração, equivale a que a diferença de fase entre as radiações refletidas nos planos cristalinos seja múltiplo de  $360^\circ$ , isto é, estejam completamente em fase. Por sua vez, para que esse quesito seja satisfeito, basta que o percurso da radiação em planos sucessivos difira de um número inteiro de comprimentos de onda, pois então, automaticamente, a diferença de percurso para dois quaisquer planos satisfará uma relação análoga.

Com isso Bragg mostrou que o ângulo de incidência, em um plano cristalino, deve ser igual ao ângulo de reflexão e que as diferenças de caminhos percorrido pela radiação

refletida nos diversos planos do cristal, sejam múltiplos inteiros de  $\lambda$ . Se  $d$  é a distância entre planos sucessivos figuras (6.2) e (6.3), a lei de Bragg, diz que

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (6.1)$$

sendo  $n$  um número inteiro positivo qualquer. Para um dado comprimento de onda incidente, haverá um feixe refletido segundo um dado ângulo  $\theta$ , somente se a lei de Bragg for satisfeita. A intensidade do feixe refletido é menor quanto maior for o valor de  $n$ .

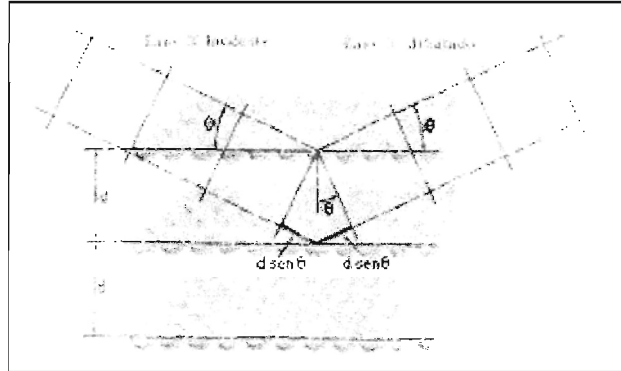


Fig. 6.2 - Lei de Bragg. A diferença de percurso entre a radiação refletida por dois planos cristalinos sucessivos vale  $2d \sin \theta$ .

Dois fatores geométricos, que valem lembrar:

1 - o feixe incidente à normal e o feixe difratado, eles são sempre coplanares,

2 - o ângulo entre o feixe difratado e o feixe transmitido é sempre  $2\theta$ .

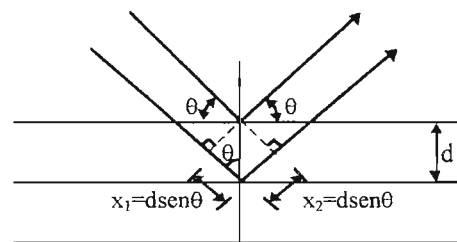


Fig. 6.3 - Lei de Bragg. A diferença de percurso entre a radiação refletida por dois planos cristalinos sucessivos vale  $2d \sin \theta$ .

Nas figuras (6.2) e (6.3) usando propriedades do triângulo retângulo e as relações trigonométricas simples, podemos determinar a diferença de percurso entre um raio refletido pelo primeiro e segundo plano cristalino,

$$\Delta = x_1 + x_2 \rightarrow \Delta = d \sin\theta + d \sin\theta, \quad (6.2)$$

logo

$$\Delta = 2d \sin\theta. \quad (6.3)$$

Como  $\Delta$  tem que ser igual a um número inteiro de comprimento de ondas, temos:

$$\Delta = n \lambda \quad (6.4)$$

Substituindo (6.3) em (6.4) temos finalmente que

$$n\lambda = 2d \sin\theta. \quad (6.1)$$

Como o seno de qualquer ângulo assume o valor máximo de 1, a equação (6.1) somente é aplicável quando

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin \theta < 1, \quad (6.5)$$

consequentemente

- °  $n\lambda$  deve ser menor ou igual a  $2d$ ,
- °  $n = 0$  corresponde ao feixe difratado na mesma direção do feixe transmitido e não pode ser observado.

Considerando  $n = 1$ , podemos escrever a lei de Bragg como

$$\lambda = 2d \sin \theta. \quad (6.6)$$

Esta equação significa que para um comprimento de onda incidente, haverá um feixe refletido segundo um dado ângulo  $\theta$  somente se a Lei de Bragg for satisfeita.

A técnica de difração de *raios x* é usada para obter informações sobre cristais, tais como distâncias interatômicas, simetrias do arranjo atômico na rede cristalina e a própria rede cristalina.

Se o comprimento de onda dos *raios x* for muito menor do que as dimensões atômicas características,  $\lambda < 1\text{\AA}$ , as fases relativas dos *raios x* espalhados pelos elétrons, em átomos diferentes ou num mesmo átomo, serão completamente aleatório ou incoerentes, excluindo a possibilidade de interferência. O processo pode ser descrito como uma interação entre os *raios x* e cada elétron separadamente, sendo a intensidade total emitida por um átomo com  $Z$  elétrons  $Z$  vezes a intensidade espalhada por um. Para este comprimento de onda a energia de ligação dos elétrons é muito menor do que a energia radiação e os elétrons podem ser considerados como partículas livres.

Experimentalmente a lei de Bragg pode ser utilizada por dois caminhos:



- Um é utilizando *raios x* de comprimento de ondas  $\lambda$  conhecido e medindo  $\theta$ , nós podemos determinar a distância  $d$  entre os vários planos no cristal. Essa é uma análise estrutural.
- O outro caminho é que é utilizado em grande parte dos livros, é usado um cristal com a distância entre os planos  $d$  conhecida, medindo  $\theta$ , e assim determinar o comprimento de ondas  $\lambda$  da radiação usada. Essa é a espectroscopia do *raio x*.

A característica essencial do espectrômetro é mostrada na figura (6.4) *Raios x* que saem do tubo T incidem no cristal C, que pode ser ajustado para qualquer ângulo desejado para a incidência do feixe, por meio de rotação em torno de um eixo O, no centro do círculo do espectrômetro. D é uma câmara de ionização ou alguma forma de opor-se a medida da intensidade do

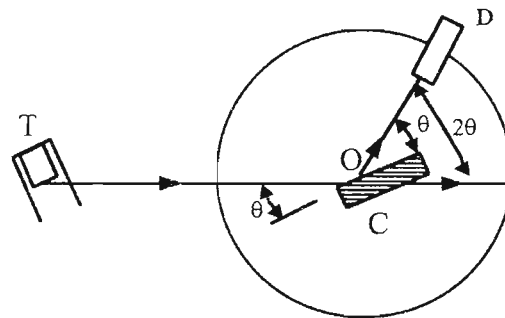


Fig. 6.4 - Espectrômetro de *raio x*. (fonte: : "*Elements of X-Ray Diffraction*", CULLITY, B. D<sup>2</sup>).

feixe difratado; o cristal também pode ser girado, em torno de O, posicionado em qualquer ângulo desejado. Usualmente, o cristal é cortado ou são feitas fendas no mesmo, de modo que um grupo particular de planos refletidos de espaçamento conhecido e são paralelos à superfície sugerida pelo desenho. O cristal é posicionado de modo que os planos refletidos façam um ângulo particular  $\theta$  com o feixe difratado. A intensidade do feixe difratado é medida e o comprimento de ondas é calculado pela lei de Bragg. Esse processo pode ser repetido para vários ângulos  $\theta$ .

Como determinar as possíveis direções, isto é, os ângulos possíveis  $2\theta$ , em que um cristal conhecido pode difratar um feixe de *raios x* monocromático ?

A difração, pode ocorrer sempre que a Lei de Bragg,  $\lambda = 2 d \sin \theta$ , é satisfeita. Essa equação expressa uma restrita condição entre  $\lambda$  e  $\theta$  para um cristal conhecido. Quando a radiação monocromática, que incide no cristal, o feixe de *raios x*, em geral, não

produz qualquer tipo de feixe difratado, pois para que isso ocorra, devemos ter  $\lambda$  e  $\theta$  adequados de modo a satisfazer a lei de Bragg e assim, ocorrerá a difração do feixe de raios  $x$ .

## 7. Alguns métodos de difração

A lei de Bragg, para  $n = 1$ ,

$$n\lambda = 2d \sin\theta,$$

somente será satisfeita se houver uma combinação adequada do comprimento de onda  $\lambda$ , do espaçamento interplanar  $d$  e do ângulo  $\theta$ . Se tomarmos valores ao acaso para estes parâmetros, dificilmente ocorrerá a igualdade de ambos os membros dessa equação.

Existem alguns métodos experimentais que facilitam a observância da lei de Bragg. Nestes métodos  $\lambda$  ou  $\theta$  são adequadamente variados. Alguns destes métodos de difração estão na tabela 2 (fonte: “*Elements of X-Ray Diffraction*”, CULLITY, B. D., Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2a. ed.).

**Tab. 2.** – Alguns métodos de difração e as suas respectivas variações de  $\lambda$  e  $\theta$ .

	$\lambda$	$\theta$
Método Laue	variável	fixo
Método de rotação	fixo	variável (em parte)
Método de pó	fixo	variável

### Método de Laue

Foi o primeiro método a ser utilizado, e é uma reprodução do experimento de Laue. Um feixe de radiação branca, do espectro contínuo

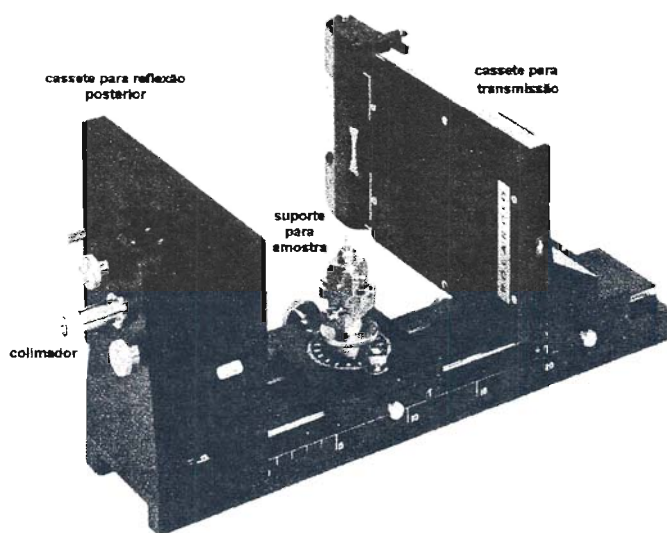


Fig 7.1 - Método de Laue. (Fonte: Elements of X-Ray Diffraction, B. D. Cullity<sup>2</sup>)

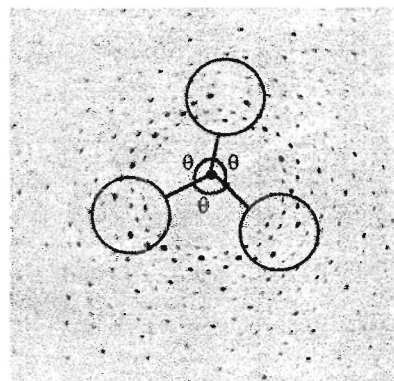


Fig. 7.2 - Uma fotografia por transmissão de um cristal de turmalina. É possível observar uma simetria por rotação de  $\theta = 120^\circ$  em torno de um eixo perpendicular ao plano do papel. (Foto obtida por Hélio Salim de Amorim, IF-UFRJ).

do tubo de *raios x*, incide sobre um cristal mantido fixo. Um conjunto de planos do cristal é mantido fixo, e para um comprimento de onda particular que satisfaça a Lei de Bragg, devemos ter uma mancha no filme fotográfico (fig. 7.1 e 7.2).

### Método de rotação do cristal

O cristal é montado sobre o eixo de rotação, no centro, sendo o feixe de *raios x* monocromático incidente, normal ao plano do cristal. Um filme cilíndrico é colocado ao redor do cristal, de modo que o eixo do filme coincida com o eixo de rotação do cristal. Na rotação do cristal, quando um grupo de planos do cristal fazem o ângulo de Bragg correto para a reflexão do feixe monocromático incidente e o feixe refletido é formado arbitrariamente, em qualquer direção (fig. 7.3 e

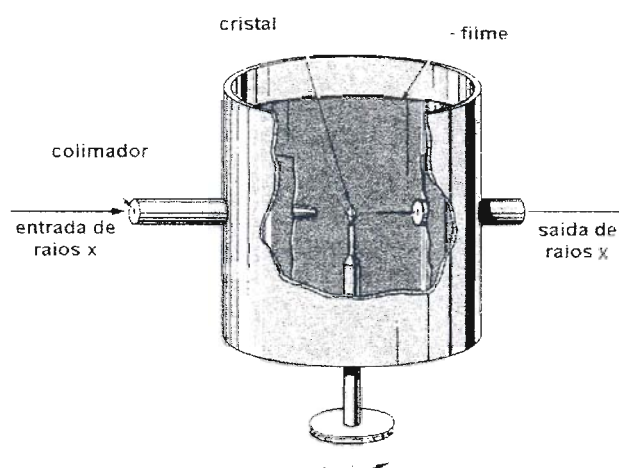


Fig. 7.3 - Uma câmara de monocristal rotatório, com o cristal montado no eixo de rotação. (Fonte: Introduction to Solid State Physics, C. Kittel<sup>9</sup>).

7.4). Esse método permite valores para  $\theta$  entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , para todos os grupos de plano do cristal, utilizando um comprimento de onda,  $\lambda$ , conhecido.

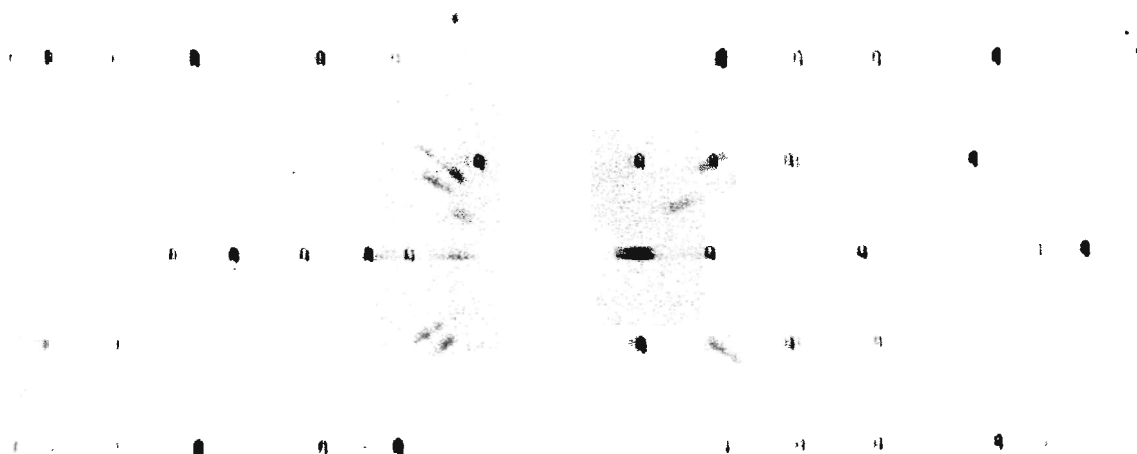


Fig. 7.4 - Fotografia obtida a partir do método de rotação do cristal na qual foi utilizado um cristal de hexacianeto de rodio. (Foto obtida por Hélio Salim de Amorim, IF-UFRJ).

### Método de Pó

O cristal, a ser examinado é reduzido a um pó muito fino. sobre esse pó um feixe de *raios x* monocromático.

Cada partícula de pó do cristal, que é muito pequena, está orientada ao acaso em relação ao

feixe incidente (fig. 7.5 e 7.6). Justamente por esse motivo, qualquer uma das partículas orientadas corretamente, de modo que seus planos, possam refletir o feixe incidente. Ou seja, somente àqueles cujas orientações satisfaçam a lei de Bragg.

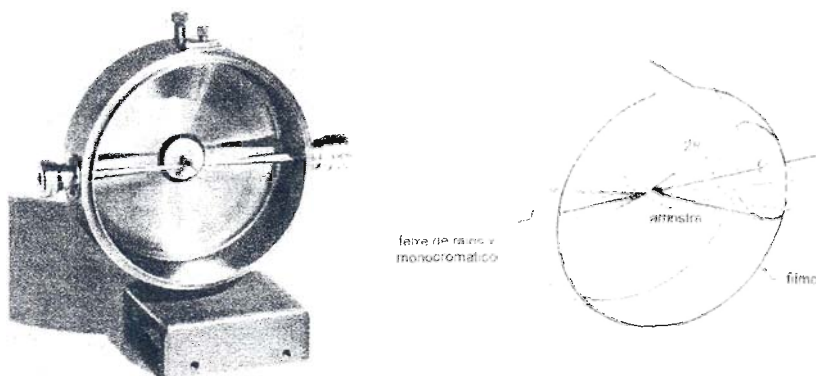


Fig. 7.5 - Câmara de difração de *raios x* de material policristalino, também chamada de Debye. A amostra é um pó policristalino. (Fonte: "Introduction to Solid State Physics", C. Kittel<sup>9</sup>).

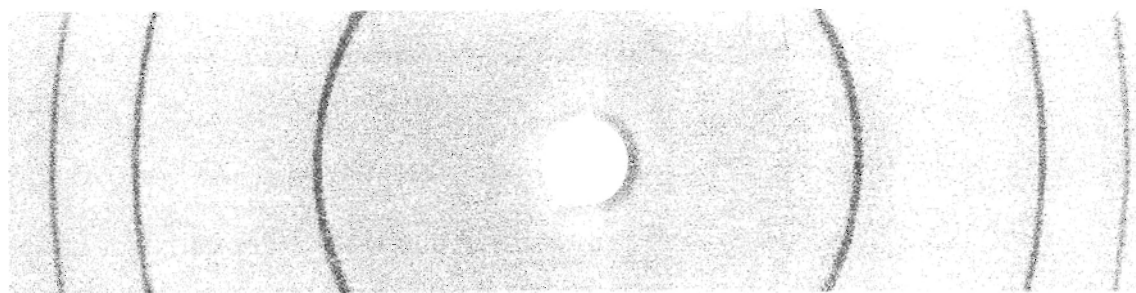


Fig. 7.6 - Um fotografia Debye do silício. (Foto obtida por autor não identificado)

## 8. Algumas aplicações da radiação x

As aplicações dos *raios x* ficaram imediatamente evidentes, após as experiências de seu descobridor, que comprovou a sua capacidade de atravessar os corpos. Na medicina os *raios x* são utilizados para diagnosticar muitas doenças e perturbações orgânicas. No tratamento do câncer, altas doses de *raios x* são focadas no tecido anormal. A radiação x é também Utilizada na odontologia.

Mas não foi somente a medicina e a odontologia que se beneficiaram com esta grande descoberta. A indústria busca, com esta radiação, maneiras de verificar falhas nas peças fundidas ou soldadas, defeitos nas estruturas de concreto, pontos francos de tubulações e sistemas hidráulicos. É utilizada, também, na esterilização de alimentos, na localização de jazidas minerais e até na identificação de obras de arte.

Uma das aplicações dos *raios x* é a radiolocalização - um método de detectar falhas em peças fundidas, fendas nos carris, verificação da qualidade das costuras de soldagem, etc. A radiolocalização com raios x é baseada na variação da absorção dos *raios x* pelo objeto, se dentro dele existirem cavidades ou corpos estranhos.

Os *raios x* são amplamente aplicados na investigação científica. Devido ao quadro de difração, que nos é dado pelos *raios x* quando atravessam cristais, é possível verificar a ordem de disposição dos átomos no espaço-estrutura dos cristais. Fazer isto para os cristais de substâncias inorgânicas não foi muito difícil. Mas com o auxílio da análise estrutural com raios x pode-se decifrar a estrutura das ligações orgânicas complexas, incluindo as proteínas. Em particular, foi determinada a estrutura das moléculas da hemoglobina que contém dezenas de milhares de átomos.

Isto foi possível graças ao fato do comprimento de onda dos *raios x* ser muito pequeno e de isso tornar possível “ver” as estruturas moleculares. Ver, como é evidente, não no sentido literal da palavra; trata-se de obter uma figura de difração, com o auxílio do qual, trabalhando bastante na sua decifração, se pode conhecer a disposição dos átomos no espaço .

## 9. Conclusão

A fenômeno da geração de *raios x* e algumas de suas aplicações já é apresentado em alguns textos a nível de segundo grau, como por exemplo *Física para o 2º grau – Eletricidade e Ondas* - Luiz A.G.; Marcelo F.B.<sup>5</sup>; e *Física 3* – Ramalho, Francisco Jr.; Nicolau, Giberto Ferraro e Toledo, Paulo Antônio<sup>11</sup>, porém esses tópicos não chegam a ser trabalhados pelos professores, por terem eles, para o ano letivo, um conteúdo programático muito extenso e, também, por falta de tempo hábil para a iniciação e conclusão deste assunto. Estamos apresentando os *raios x* de modo a despertar o interesse dos estudantes, sem, contudo, nos prendermos muito a sua utilização na área médica, pois a nossa discussão trata basicamente da difração dos *raios x* e não da absorção dos mesmos, já que é esta a propriedade utilizada na área médica e odontológica, a propriedade de absorção dos *raios x*, por alguns órgãos de nosso corpo. Quando falamos de produção da radiação *x*, para o aluno este é um aspecto novo e serve tanto para difração como para que o aluno entenda como é gerado a radiação usada na medicina. E que isso possa fazer com que ele se questione, todas as vezes que precisarem utilizar um aparelho de *raios x*.

O conhecimento das leis e fenômenos físicos constitui um complemento indispensável à formação cultural do homem moderno, não só em virtude do grande desenvolvimento científico do mundo atual, como também porque o mundo da física nos rodeia por completo. O ensino da difração de *raios x* vem para adicionar novos conceitos sobre este tipo de radiação. Grande parte, senão a maioria dos alunos, só a conhecem, como aquela emitida pelos aparelhos de radiografia utilizado em consultórios médicos e odontológicos. Porém, a radiação *x* não possui apenas esta utilidade, entre outras coisas, são utilizadas para análise estrutural de cristais, a partir de alguns métodos, como foram citados na seção 6. E se conseguirmos fazer com que o aluno perceba que os assuntos, por ele já vistos, não terminaram quando o professor encerrou um tópico e sim, que era apenas o início, ou seja, que existem outras aplicações para o que ele viu e não única e exclusivamente àquela dentro daquele contexto. Como por exemplo, no estudo de movimento de cargas em um campo magnético uniforme, podemos mostrar ao aluno a associação existente entre esses tipo de movimento e a geração de *raios x*. Assim fazendo com que compreenda um pouco da radiação *x*, que tem uma grande importância para a

ciência e até mesmo para nós, enquanto seres humanos, e que em termos de ensino médio, este assunto não é abordado nem pelos livros nem pelos professores.

Uma das dificuldades deste trabalho é que os alunos deverão possuir um conhecimento prévio sobre certos assuntos, para ajudá-los na compreensão do estudo dos *raios x*. Outra é passar para os alunos do ensino médio, o conteúdo sobre *raios x* de maneira simplificada sem, contudo, perder a essência das informações, que são preciosas para o bom entendimento deste assunto, tornando o texto mais ameno e agradável. Deve-se evitar que o aluno considere este assunto, como sendo mais uma de suas obrigações escolares, tentando com isso entusiasmar tantos aos jovens que pretendem continuar seus estudos em uma carreira ligada a ciência exata, como àqueles que provavelmente não terão mais contato com o estudo da física.

Albert Einstein disse “*a mente que se abre a uma nova idéia, jamais volta ao seu tamanho original*”. Como acabamos de ver, este assunto envolve conceitos novos diretamente relacionados a conceitos previamente vistos pelos alunos. Sendo este um assunto de interesse, pois tendo eles contatos, nem que tenha sido uma única vez, como usuários de uma das utilidades da radiação x, mesmo não sendo esta utilização da radiação, o nosso assunto principal, é fato que o conhecimento básico sobre ela é engrandecedor, a partir desse interesse se faz necessário uma reflexão sobre uma série de assuntos já vistos em anos anteriores. Mas como permitir que o ensino de física contribua para a formação cultural científica do aluno? Bem, o estudo da radiação x, especificamente, possibilita aos alunos revejam conceitos básicos da Física Clássica e alguns assuntos de física moderna, já visto basicamente no ensino de química, conceitos estes que permitem a eles construir uma ponte entre este conhecimento e as suas utilizações. Conceitos que ele já deve ter estudado; como por exemplo, conhecimento de:

- frequência,
- período,
- comprimento de onda,
- fenômenos de interferência,
- circuitos elétricos,
- potência,



- energia.

E também de física quântica :

- distribuição eletrônica em Física Moderna,
- transição entre níveis eletrônicos

que ilustram a aplicação destes conceitos e a suas aplicações em nosso estudo sobre radiação, que se conveniente explorados vão permitir que ele tenha uma melhor visão da amplitude do assunto que já estudou, o mesmo ocorrendo com vários outros assuntos abordados. Observa-se que se bem explorado, um assunto diferente pode permitir ao aluno uma aplicação dos temas que já tinha conhecimento, dando-lhe a oportunidade de verificar uma aplicação prática de seus conhecimentos adquiridos, consolidando, assim, a autonomia cultural necessária ao exercício cidadania e a expansão dos conhecimentos desenvolvidos.

## 10. Referências Bibliográficas

1. CULLITY, B. D., "*Elements of X-Ray Diffraction*", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1a. ed..
2. CULLITY, B. D., "*Elements of X-Ray Diffraction*", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 2a. ed..
3. KNOLL, G. F., "*Radiation Detection and Measurement*", John Wiley & Sons, 2a. ed., pág. 59 a 63.
4. ENCICLOPÉDIA MIRADOR INTERNACIONAL, Ed. Encyclopaedia Britannica do Brasil Publicações LTDA, volumes 08 e 17, 1994
5. LUIZ A.G.; MARCELO F.B., "*Física para o 2º grau – Eletricidade e Ondas*", Editora Harbra, 1ª edição, 1998.
6. CHIQUITO, Marcos; VALENTIM, Bárbara; PAGLIARI, Estéfano "*Aprendendo Física 2*", editora Scipione, 1ª edição, 1996 .
7. ALMANAQUE ABRIL 95, "*A Enciclopédia em Multimídia*", Abril Multimídia, 1994.
8. FELTRE, Ricardo, QUÍMICA GERAL, Volume 1, Editora Moderna, 2ª edição, 1998.
9. KITTEL, C., "*Introduction to Solid State Physics*", John Wiley & Sons, Inc., 1976, cap. 2.
10. Site [www.geiger.com.br](http://www.geiger.com.br)
11. RAMALHO, Francisco Jr.; NICOLAU, Gilberto Ferraro e TOLEDO, Paulo Antônio Soares, "*Física 3*", 6ª Edição, Editora Moderna.
12. CARRON, Wilson e GUIMARÃES, Osvaldo, "*As Faces da Física*", 1ª Edição, Editora Moderna.
13. CALAÇA, Caio Sérgio e SAMPAIO, José Luiz, "*Física Clássica – Óptica e Ondas*", Atual Editora, 1ª Edição, ano 1997.
14. PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS – MEC/SEMTC – 1998
15. Site [www.fisica.ufc.br/raiosx](http://www.fisica.ufc.br/raiosx)